

# 施氮制度及间作对燕麦氮素吸收和土壤氮素的影响

张宁,赵桂琴,张丽睿,杜文盼,柴继宽\*

(甘肃农业大学草业学院,草业生态系统教育部重点实验室,甘肃省草业工程实验室,中-美草地畜牧业可持续发展研究中心,甘肃 兰州 730070)

**摘要:**【目的】研究不同的施氮制度对燕麦/豌豆间作体系中燕麦的吸收情况以及对土壤氮素的影响。【方法】采用随机区组试验设计,设N0(不施氮)、N1(基肥20%+分蘖期追肥20%+开花期追肥60%)、N2(基肥20%+分蘖期追肥30%+开花期追肥50%)和N3(基肥20%+分蘖期追肥40%+开花期追肥40%)4个施氮制度;3种植植模式(燕麦/豌豆间作、燕麦单作和豌豆单作),研究施氮制度对间作燕麦氮素吸收和土壤氮素的影响。【结果】施氮制度和间作对燕麦籽粒产量、氮素吸收和土壤氮素影响显著。间作燕麦籽粒产量在N2处理下最大,较N3增产22.48%。随着生育期的推进,在拔节期、抽穗期、灌浆期和成熟期间作燕麦的吸氮量较单作燕麦分别提高了26.5%、15.8%、7.3%和17.1%;间作燕麦在N2处理下吸氮量最大,为71.2 kg/hm<sup>2</sup>,较N0增加了49.9%。在0~20 cm土层间作燕麦的土壤全氮含量在N0、N1、N2和N3处理下分别较单作提高12.9%、11.2%、15.4%和6.9%;间作燕麦在拔节期、抽穗期、灌浆期和成熟期的土壤硝态氮含量和铵态氮均高于单作燕麦。【结论】在20~40 cm土层,间作燕麦较单作燕麦的土壤全氮和硝态氮含量增加;铵态氮含量降低,但增加和降低差异不显著。

**关键词:**燕麦/豌豆间作;氮素吸收;土壤氮素

**中图分类号:**S543<sup>+</sup>.7 **文献标志码:**A **文章编号:**1009-5500(2024)02-0164-09

**DOI:**10.13817/j.cnki.cycp.2024.02.017



燕麦(*Avena sativa*)作为重要的一年生禾本科饲草,其茎叶柔嫩,粗纤维含量较少,且具有适应性强,草产量高,适口性好等特点,广泛种植于我国北方冷凉地区<sup>[1]</sup>,常单作或与其他豆科植物混播、间作<sup>[2-3]</sup>。间作是一种较为普遍的高产种植方式,它能充分利用

地力、光能和热能资源,是植物增产的重要措施之一<sup>[4]</sup>。目前间作组合中,禾本科与豆科作物间作因为高产和增加作物生产力的稳定性<sup>[5]</sup>等特性在生产实践中备受关注<sup>[6-7]</sup>。已有研究表明,选择不同植物合理搭配进行间作对于间作体系的生产力有很大的作用<sup>[8]</sup>。如燕麦/大豆间作<sup>[3]</sup>、燕麦/绿豆间作<sup>[9]</sup>、燕麦/紫花苜蓿间作<sup>[10]</sup>等模式都不同程度地提升了燕麦的产量,提高了牧草土地利用效率。氮素享有“生命元素”之称,是植物生长所必需的大量元素之一<sup>[11]</sup>。氮素吸收是植物生物量累积的基础,而生物量又是植物获得高产的保证<sup>[12]</sup>。长期以来,氮素管理都是田间养分管理的重点研究内容<sup>[13]</sup>。有研究表明<sup>[14]</sup>,氮素营养是调控作物生长及光合生产的重要手段之一,其贡献率为40%~50%<sup>[15-16]</sup>。在禾本科与豆科间作体系中,氮素的高效吸收利用特征主要是因为不同植物种间氮素

**收稿日期:**2022-03-25; **修回日期:**2022-04-21

**基金项目:**甘肃农业大学科技创新基金-盛彤笙创新基金(GSAU-STS-2018-21);农业农村部现代农业产业技术体系(CARS-07-C-1);甘肃省重大专项(19ZD2NA002-31)

**作者简介:**张宁(1999-),女,山西平定人,硕士研究生。主要从事牧草种质资源及育种研究。

E-mail:1208176932@qq.com

\*通信作者。E-mail:chaijk@gsau.edu.cn

互补利用<sup>[17]</sup>,而施氮水平<sup>[18]</sup>是调控禾本科与豆科间作体系种间关系常见的一种措施。大麦间作蚕豆试验表明<sup>[19]</sup>,随着施氮量的增加,单作和间作氮素吸收量和吸收速率均随着施氮量的增加呈上升的趋势,并且合理的施氮水平可以提高间作作物对病害的防治效果。

禾本科与豆科间作体系中豆科作物固定的氮对土壤肥力的改善主要表现在增加了土壤有效氮,即土壤中的硝态氮;另一方面,由于豆科植物的生物固氮特性,减少了豆科植物对土壤氮素及肥料中氮的吸收利用,“节约”出来的氮改善了土壤肥力<sup>[20]</sup>。有研究表明,一年生禾豆间作系统对土壤全氮含量影响较小<sup>[21]</sup>,但随施氮量的增加有明显增加<sup>[22]</sup>。土壤硝态氮和铵态氮作为速效氮,施氮能明显影响其含量,随施氮量的增加土壤硝态氮和铵态氮含量均增加<sup>[21]</sup>。一般情况下土壤表层铵态氮含量最高<sup>[23]</sup>,硝态氮在降水量或灌水量较大时,易在土壤60 cm处及更深层累积,增加淋失风险<sup>[24]</sup>。玉米/大豆间作系统中,追施氮肥提高了0~20 cm土层土壤硝态氮含量,20~40 cm土层由于根系分布密集土壤硝态氮含量变化不大<sup>[25]</sup>。禾豆间作系统中,豆科作物生长初期必须要有一定量的启动氮才能形成根瘤,氮素水平过高则抑制其生长固氮,形成“氮阻遏”。

由上可见,施用氮肥对禾本科与豆科间作体系氮素吸收和土壤氮素调控作用明显,但是不同的施氮制度对燕麦/豌豆间作体系中燕麦氮素吸收和土壤氮素的影响等方面缺乏详细的报道,尚需研究。因此,本研究对不同施氮制度下燕麦氮素吸收和土壤氮素进行量化分析,以期为北方冷凉地区发展燕麦/豌豆间作模式和合理的施氮提供理论依据和技术支持。

## 1 材料和方法

### 1.1 试验地概况

试验于2019年在甘肃省定西市通渭县华家岭乡老站村(105°01' E, 35°23' N)进行,海拔2 242 m,年平均气温3.4 °C,无霜期140 d,平均年降水量500 mm,日照时数2 100~2 430 h,≥0 °C的积温为2 530 °C。试验地土壤全氮含量2.3 g/kg、速效氮含量141.39 mg/kg、速效磷含量38.52 mg/kg、速效钾含量136.92 mg/kg、土壤pH值7.92、有机质含量4.67%。

### 1.2 供试材料

供试燕麦品种为陇燕3号,豌豆品种为定豌3号,均由甘肃农业大学草业学院提供。

### 1.3 试验设计

采用随机区组设计,种植模式为单作豌豆、单作燕麦、燕麦间作豌豆;氮肥按照当地习惯施氮量,设为N 100 kg/hm<sup>2</sup>。设4个施氮制度。N0:不施氮;N1:总施氮量的20%为基肥、燕麦分蘖期/豌豆分枝期追肥20%,燕麦开花期追肥60%;N2:总施氮量的20%为基肥、燕麦分蘖期/豌豆分枝期追肥30%,燕麦开花期追肥50%;N3:总施氮量的20%为基肥、燕麦分蘖期/豌豆分枝期追肥40%,燕麦开花期追肥40%。为防止“氮阻遏”,对豌豆仅在分枝期追施一次氮肥。单作豌豆的施肥磷肥按照N:P为1:0.75的比例,即75 kg/hm<sup>2</sup>(纯P)全部作为基肥施用。全生育期无灌溉。共12个处理,每处理3次重复(表1)。

单作和间作燕麦行距按当地习惯设为20 cm,播种量200 kg/hm<sup>2</sup>;单、间作豌豆行距设为20 cm,播种量262.5 kg/hm<sup>2</sup>。燕麦与豌豆间作比例为6:4,即6行燕麦和4行豌豆,带幅分别为120 cm和80 cm(图1)。小区面积28 m<sup>2</sup>(7 m×4 m),小区间走道1.0 m,燕麦与豌豆同时播种。

### 1.4 样品采集与测定

1.4.1 土壤样品采集与测定 在燕麦拔节期、抽穗期、灌浆期和成熟期,分别在单作和间作燕麦带处理中用土钻采集0~20、20~40 cm土壤样品,每带随机选取5点混合,新鲜土样混合均匀后分成2部分尽快回至试验室。一部分过2 mm筛,用2 mol/L KCl浸提,连续流动分析仪测定滤液中的硝态氮和铵态氮含量;另一部分风干后过0.25 mm筛,用凯氏定氮法测定土壤全氮含量<sup>[26]</sup>。

1.4.2 器官干物质重 分别在燕麦拔节期、抽穗期、灌浆期和成熟期在各小区随机取1 m单行样段,齐地刈割并测鲜重,将燕麦地上部分分为茎、叶和穗,再于105 °C下烘30 min,转入80 °C烘箱中烘至恒重,计算干重,3次重复。干样采用小型粉碎机粉碎,而后过100目筛,装袋待测。

1.4.3 植株含氮量测定 用H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>~H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>消煮,凯氏定氮法测定燕麦植株不同时期各器官的氮含量。

1.4.4 吸氮量 吸氮量=Σ(器官干物质重×器官氮

表1 处理及不同处理的施氮制度  
Table 1 Fertilization levels and treatment codes

种植模式	处理	施氮制度	基肥/(kg·hm <sup>-2</sup> )	追肥/(kg·hm <sup>-2</sup> )		总施氮量/(kg·hm <sup>-2</sup> )
				分蘖/分枝期	开花期	
单作燕麦	ON0	N0	0	0	0	0
	ON1	N1	20	20	60	100
	ON2	N2	20	30	50	100
	ON3	N3	20	40	40	100
单作豌豆	PN0	N0	0	0	0	0
	PN1	N1	20	20	0	40
	PN2	N2	20	30	0	50
	PN3	N3	20	40	0	60
燕麦和豌豆 间作	OPN0	N0	0	0	0	0
	OPN1	N1	20	20	60	100
	OPN2	N2	20	30	50	100
	OPN3	N3	20	40	40	100

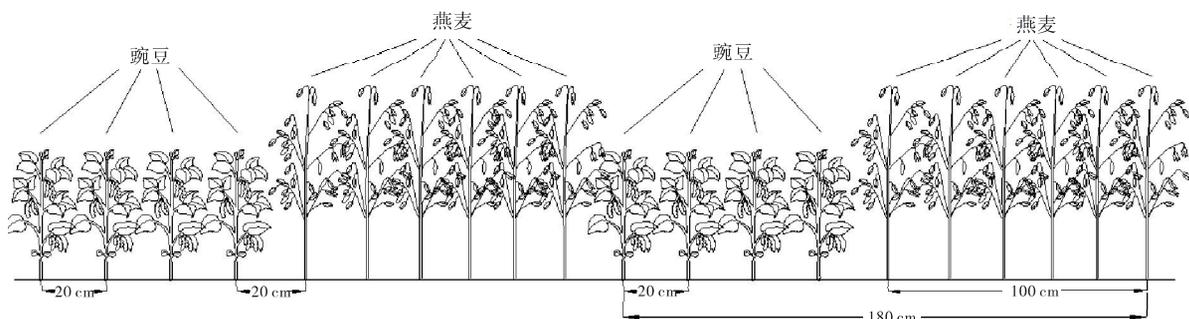


图1 燕麦豌豆间作种植结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of Oat/pea intercropping

含量)

1.4.5 籽粒产量 燕麦、豌豆成熟后全区收获、计产(除去取样植株所占面积),脱粒晾晒后称重,计算籽粒产量。

## 1.5 数据处理

采用Excel进行数据整理、分析与作图,用SPSS 19.0软件进行方差分析、多重比较用Duncan法。

## 2 结果与分析

### 2.1 施氮制度对间作体系籽粒产量的影响

相同占地面积不同施氮制度下,燕麦/豌豆间作显著提高了燕麦籽粒产量(表2)。在N0、N1、N2和N3水平下,与相应单作处理相比,间作燕麦籽粒产量分别增加了13.56%、22.01%、21.56%和17.25%,平均增幅为18.60%;与相应单作相比,间作豌豆籽粒产量也显著提高,分别增加了26.95%、36.24%、33.67%和18.77%,可见间作对提高籽粒产量效果显

著。同一种植模式不同施氮制度下,单作和间作燕麦籽粒产量均在N2处理下达到最大,分别为3 048.1 kg/hm<sup>2</sup>和3 705.3 kg/hm<sup>2</sup>,与N1处理无显著差异,但显著高于N3和不施氮处理。单作和间作豌豆在N1水平下获得最大籽粒产量,分别为1 522.1 kg/hm<sup>2</sup>和2 073.7 kg/hm<sup>2</sup>。

### 2.2 施氮制度与间作对燕麦氮素吸收的影响

表3表示相同占地面积下单、间作燕麦在不同生育时期植株吸氮量累积变化,其中单作燕麦吸氮量是折算成60%土地面积下的值。单作燕麦吸氮量随生育期的推进呈先增后减的变化趋势,4种施氮制度下均在灌浆期达到最大,成熟期较灌浆期分别减少7.1%、8.1%、16.5%和1.2%;而间作燕麦则没有明显变化规律,N0、N2制度在灌浆期达到最大,N1、N3则在成熟期达到最大。

间作燕麦的吸氮量均大于单作,拔节期、抽穗期、灌浆期和成熟期其吸氮量较相应单作提高了26.5%、

表2 不同处理下燕麦、豌豆的籽粒产量

Table 2 Yield of oat and pea under different treatments

处理	籽粒产量/(kg·hm <sup>-2</sup> )		
	燕麦	豌豆	总产
ON0	2 259.2 <sup>c</sup>		
ON1	2 889.1 <sup>b</sup>		
ON2	3 048.1 <sup>b</sup>		
ON3	2 580.0 <sup>bc</sup>		
PN0		1 028.0 <sup>d</sup>	
PN1		1 522.1 <sup>bc</sup>	
PN2		1 384.8 <sup>cd</sup>	
PN3		1 285.7 <sup>cd</sup>	
O/PN0	2 565.5 <sup>bc</sup>	1 305.0 <sup>cd</sup>	3 870.5 <sup>b</sup>
O/PN1	3 525.0 <sup>a</sup>	2 073.7 <sup>a</sup>	5 598.7 <sup>a</sup>
O/PN2	3 705.3 <sup>a</sup>	1 851.0 <sup>ab</sup>	5 556.3 <sup>a</sup>
O/PN3	3 025.1 <sup>b</sup>	1 527.0 <sup>bc</sup>	4 552.1 <sup>b</sup>

15.8%、7.3%和17.1%；其中成熟期间作燕麦吸氮量在N0、N1、N2和N3施氮制度下较相应单作燕麦增加了21.0%、41.6%、38.0%和32.6%。比较间作燕麦在不同施氮制度下的吸氮量发现，N2制度下吸氮量最大，为71.2 kg/hm<sup>2</sup>，较N0增加了49.9%，而N1、N2和N3制度下的吸氮量差异不显著，但均显著高于不施氮处理。单作燕麦在N1、N2和N3制度下的吸氮量无明显差异，但显著高于N0。

表3 施氮制度与间作处理下燕麦的吸氮量

Table 3 Nitrogen uptake of oat under nitrogen application system and intercropping treatment

处理	拔节期	抽穗期	灌浆期	成熟期
ON0	19.95 <sup>c</sup>	26.84 <sup>f</sup>	53.92 <sup>e</sup>	50.09 <sup>e</sup>
ON1	29.97 <sup>b</sup>	43.91 <sup>de</sup>	77.25 <sup>bc</sup>	71.00 <sup>c</sup>
ON2	27.20 <sup>b</sup>	46.80 <sup>cd</sup>	76.79 <sup>bc</sup>	64.15 <sup>cd</sup>
ON3	31.87 <sup>b</sup>	39.47 <sup>c</sup>	69.80 <sup>cd</sup>	68.96 <sup>c</sup>
OPN0	29.53 <sup>b</sup>	38.93 <sup>e</sup>	60.83 <sup>de</sup>	60.62 <sup>d</sup>
OPN1	44.21 <sup>a</sup>	55.52 <sup>ab</sup>	81.56 <sup>ab</sup>	100.51 <sup>a</sup>
OPN2	45.32 <sup>a</sup>	59.77 <sup>a</sup>	91.04 <sup>a</sup>	88.54 <sup>c</sup>
OPN3	47.60 <sup>a</sup>	52.36 <sup>bc</sup>	84.85 <sup>ab</sup>	91.43 <sup>b</sup>

注：同列不同字母表示处理间差异显著( $P < 0.05$ )。

### 2.3 施氮制度与间作处理下燕麦土壤全氮变化动态

从拔节期到成熟期，间作燕麦除了N0制度下，各处理同一土层的土壤全氮含量均呈先升高后降低的趋势；单作燕麦除在N2制度下，各处理同一土层的土壤全氮含量均呈逐渐降低的趋势(图2)。在N0、N1、N2和N3制度下，间作燕麦的土壤全氮含量较单

作分别提高12.9%、11.2%、15.4%和6.9%。抽穗期N3处理下间作燕麦的土壤含氮量低于相应单作燕麦，但差异不显著；拔节期、灌浆期和成熟期土壤氮含量均在间作条件下更高，分别比相应单作高5.1%、4.2%、14.5%和21.2%。间作和单作燕麦的土壤全氮含量在抽穗期N3制度处理下最大，分别为0.96%和0.98%，灌浆和成熟期施则在N1制度处理下最大(分别为1.24%、1.03%和1.05%、0.93%)。

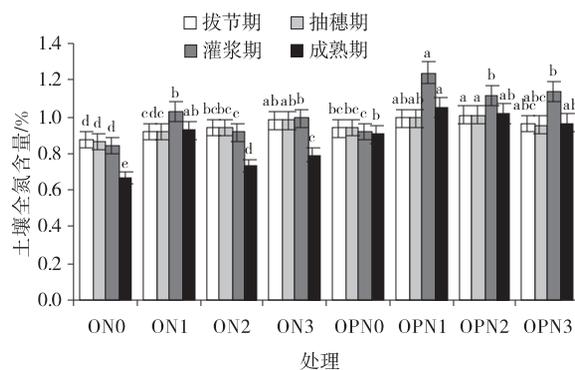


图2 施氮制度与间作处理下燕麦0~20 cm土层土壤全氮含量

Fig. 2 Total nitrogen content in 0~20 cm soil layer of oat under nitrogen application system and intercropping treatment

注：不同字母表示同一生育时期不同处理间差异显著( $P < 0.05$ )，下同。

随着土层的深入，间作和单作燕麦的土壤全氮含量在不同处理均呈缓慢下降趋势(图3)。20~40 cm土层的土壤全氮含量明显低于0~20 cm土层，但其在不同种植模式和施氮处理下的变化趋势与0~20 cm土层相似。间作燕麦各生育时期20~40 cm土壤全氮含量为0.7%~0.8%，较相应单作增加了2.1%~4.6%，差异不显著。不同施氮制度处理下，间作燕麦在N0制度下土壤全氮含量为0.7%，显著高于单作(19.8%)( $P < 0.05$ )，在N1和N3制度下全氮含量也高于相应单作，但差异不显著。

### 2.4 施氮制度及间作处理下燕麦土壤硝态氮的变化动态

燕麦0~20 cm土层土壤硝态氮含量随生育期的延长总体呈下降趋势(图4)。与施氮处理相比，不施氮(N0)处理下降幅更大，间作燕麦抽穗期、灌浆期和成熟期的土壤硝态氮与拔节期相比分别下降了14.7%、14.3%和27.3%，单作燕麦分别下降了11.5%、13.4%和28.9%，其中成熟期硝态氮与其他

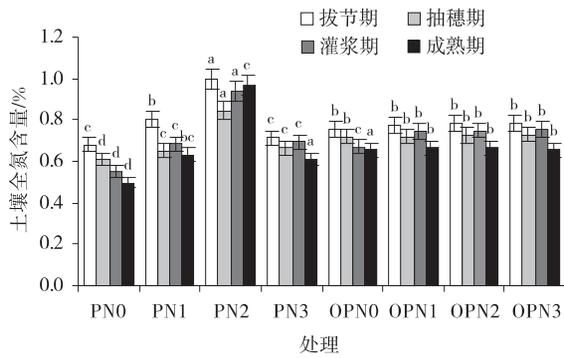


图3 施氮制度与间作处理下燕麦20~40 cm 土层土壤全氮含量

Fig. 3 Total nitrogen content in 20~40 cm soil layer of oat under nitrogen application system and intercropping treatment

时期差异显著( $P < 0.05$ )。间作燕麦在拔节期、抽穗期、灌浆期和成熟期的土壤硝态氮含量较单作分别高5.4%、1.5%、6.4%和7.7%,但差异不显著。

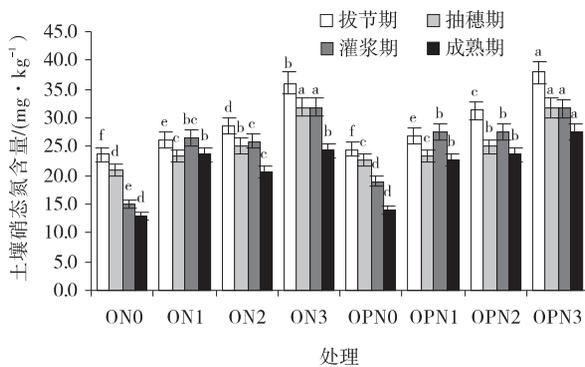


图4 施氮制度与间作处理下燕麦0~20 cm 土层土壤硝态氮含量

Fig. 4 Nitrate nitrogen content in 0~20 cm soil layer of oat under nitrogen application system and intercropping treatment

N0 制度下,间作燕麦生育期土壤硝态氮含量较单作高3.9%~7.8%,铵态氮平均含量较单作高9.4% (图5);N1 制度下成熟期间作燕麦的土壤硝态氮含量较单作低4.4%,其余各生育时期间作燕麦带的土壤硝态氮含量均较单作高2.3%~3.7%,N2、N3 制度下间作燕麦带生育期平均硝态氮含量分别比单作高6.7%和3.8%。间作燕麦在拔节期、抽穗期、灌浆期和成熟期的土壤硝态氮含量较相应的单作高5.1%~7.2%,但差异不显著。

### 2.5 施氮制度及间作处理下燕麦土壤铵态氮的变化动态

施氮制度及间作处理对燕麦0~20 cm 土层土壤铵态氮含量的影响差异显著,铵态氮含量随生育期的

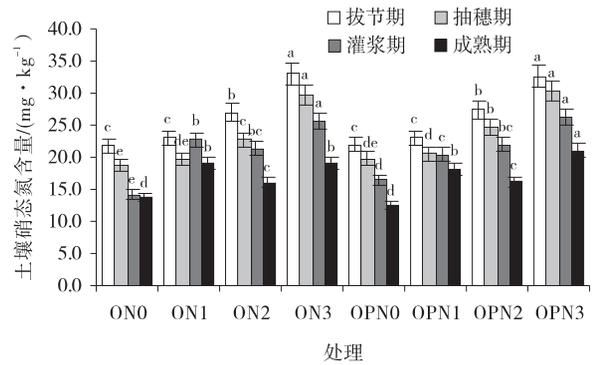


图5 施氮制度与间作处理下燕麦20~40 cm 土层土壤硝态氮含量

Fig. 5 Nitrate nitrogen content in 20~40 cm soil layer of oat under nitrogen application system and intercropping treatment

延长总体呈下降趋势(图6)。N0 制度下,间作燕麦全生育期土壤铵态氮平均含量较单作高15.3%;N1、N2 和 N3 下分别较相应单作高8.9%、6.9%和10%。间作燕麦的土壤铵态氮含量在拔节期、抽穗期、灌浆期和成熟期分别为8.6、6.7、5.9和4.5 mg/kg,较相应的单作分别增加了21.1%、5.8%、7.2%和5.6%。

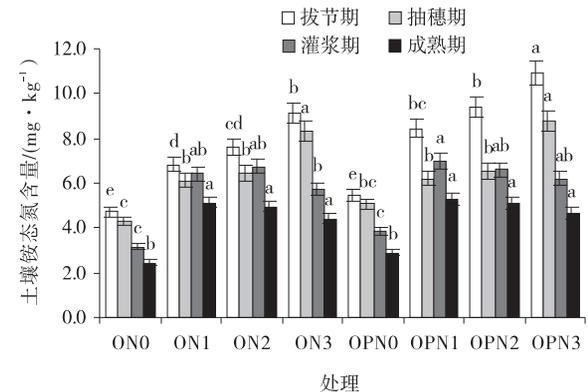


图6 施氮制度与间作处理下燕麦0~20 cm 土层土壤铵态氮含量

Fig. 6 Ammonium nitrogen content in 0~20 cm soil layer of oat under nitrogen application system and intercropping treatment

20~40 cm 土层土壤铵态氮含量 N0 和 N1 制度下成熟期间作燕麦较单作分别低24.8%和10.1% (图7);N2 制度下间作燕麦拔节期、抽穗期、灌浆期和成熟期土壤铵态氮含量较相应单作分别减少12.7%、16.8%、19.8%和23.1%;N3 制度下灌浆期和成熟期则分别下降了10.9%和13.5%。整体来看,间作燕麦在拔节期、抽穗期、灌浆期和成熟期分别比单作低2.6%、1.2%、6.4%和17.9%。

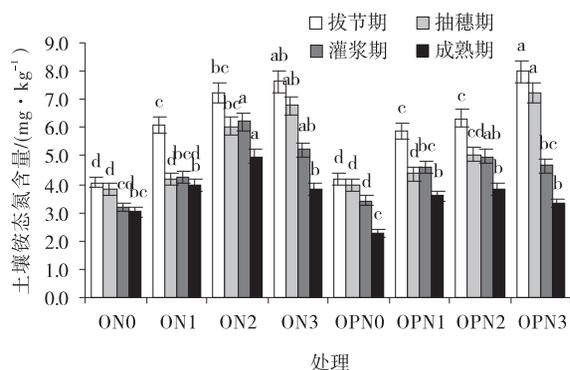


图7 施氮制度与间作处理下燕麦 20~40 cm 土层土壤铵态氮含量

Fig. 7 Ammonium nitrogen content in 20~40 cm soil layer of oat under nitrogen application system and intercropping treatment

### 3 讨论

氮素作为限制植物产量的重要因素之一,合理施用可促进作物生长,提高产量<sup>[27-28]</sup>。较高的氮肥基施对禾本科植物分蘖成穗数有显著促进作用,但氮肥过多会使无效分蘖增多和徒长,增加倒伏和病虫害的发生几率,减少光合产物向籽粒的转运<sup>[29]</sup>。因此合理的氮肥运筹对提高植物产量、品质及氮素利用率至关重要<sup>[30]</sup>。本试验中单、间作燕麦均在N2制度下获得最大籽粒产量,即分蘖期、开花期追肥量分别占总施氮量的30%和50%最有利于燕麦籽粒的提高。这与胡群<sup>[31]</sup>、柯健<sup>[32]</sup>等提出的钵苗摆栽籼粳杂交稻基肥:穗肥应为6:4有所不同,可能与作物种类、生长特性与环境及氮素利用特性有关。

间作系统中两种植物生产特性的变化主要是它们对水、肥、气、热等资源的竞争吸收与协调利用之间平衡后的结果,是两种作物的地上、地下生态位错位造成的。氮肥对间作系统中植物光合作用、养分吸收、利用和分配有一定影响<sup>[33]</sup>。在禾本科/豆科间作系统中,养分的吸收、积累和循环是研究的核心内容之一<sup>[34]</sup>。杨学超等<sup>[9]</sup>研究了施氮量对绿豆/燕麦间作系统生产力及氮吸收积累的影响,发现间作系统的氮素吸收较单作优势明显,且随施氮量的增加优势逐渐增大,但施氮量超过120 kg/hm<sup>2</sup>时,吸氮量增加不明显。本研究中,间作燕麦在N2处理下吸氮量最大,较N0增加了49.9%;其吸氮量均大于单作,成熟期吸氮量较单作提高了17.1%;这表明燕麦/豌豆间作体系可以通过对养分吸收和利用来协调植株氮含量的

分配。

土壤全氮是标志土壤氮素总量和供应植物有效氮素的源和库<sup>[35]</sup>。间作豆科作物可产生直接或间接的氮素转移,供给禾本科作物或释放到周围土壤<sup>[36]</sup>。关正翹等<sup>[37]</sup>研究了不同混播方式下燕麦、箭筈豌豆混播草地土壤养分特征,发现豆禾混播比例3:1时土壤全氮含量较燕麦单作显著增加。本试验中,间作燕麦的0~20和20~40 cm土层的全氮含量分别较相应单作提高了7.7%~17.8%和4.8%~28.3%,而间作豌豆的全氮含量则小于单作,说明燕麦//豌豆间作中,燕麦可以竞争利用豌豆的氮。由于本试验未将不同来源的氮进行标记区分,因此间作燕麦带多出的氮来自豌豆生物固氮还是豌豆带氮肥,还需要进一步研究。

土壤全氮含量并不能完全决定土壤的供氮能力,只有被植物所吸收利用的氮素才是真正起作用的部分<sup>[38]</sup>。硝态氮和铵态氮是土壤速效氮的两种主要形式<sup>[39]</sup>,是判断土壤氮素盈亏的重要指标,因此在生产实践中土壤无机态氮含量的变化更重要<sup>[40]</sup>。本试验中间作和单作土壤不同土层的硝态氮与土壤全氮含量变化基本一致,即0~20与20~40 cm间作燕麦土壤硝态氮含量大于单作,进一步证明燕麦豌豆间作体系中存在氮素竞争互补利用。土壤硝态氮作为植物能够直接吸收利用的一种速效养分,很容易随土壤水而流失<sup>[41]</sup>。不同施氮制度下,间作和单作燕麦0~20和20~40 cm土层的硝态氮含量除不施氮处理N0外,N1处理下土壤硝态氮含量最低,可能是N1处理下间作群体的地上生物量和籽粒产量最高,从土壤中带走的氮素最多,导致土壤中的氮含量降低<sup>[42]</sup>。铵态氮是另外一种重要的土壤无机氮,也是植物吸收氮素的一种主要形式,铵态氮一般会通过硝化作用快速转化为硝态氮,因此铵态氮含量明显低于硝态氮<sup>[43]</sup>。本试验结果与此基本一致,在不同施氮制度和间作处理下,相同土层土壤铵态氮显著低于硝态氮。诸多研究表明<sup>[44-46]</sup>,土壤中土壤硝态氮、铵态氮含量在整个生育期呈下降趋势,本试验也得到类似结果,即施氮制度及间作处理对燕麦0~40 cm土层土壤硝态氮和铵态氮含量的影响差异显著,随着土层的加深,硝态氮和铵态氮含量随生育期的延长总体呈下降趋势。但土

壤铵态氮含量的变化与土壤全氮和硝态氮并不完全一致,0~20 cm土层铵态氮表现为间作高于单作,20~40 cm土层则相反。这可能是燕麦豌豆在共生期对于土壤硝态氮和铵态氮的吸收不同造成的,燕麦间作减少了矿质氮素在土壤中的残留。

#### 4 结论

间作配合适宜施氮制度是获得高产的有效途径,在N2制度下可使间作燕麦获得最大籽粒产量。随着生育时期的推进,不同施氮制度和间作显著提升了燕麦氮素的吸收,且在N2制度下达到最大。不同施氮制度处理下间作燕麦土壤全氮、硝态氮含量高于单作;随着土层的深入,间作和单作燕麦的土壤硝态氮和铵态氮含量在不同土层基本呈缓慢下降趋势。

#### 参考文献:

- [1] 赵桂琴,师尚礼. 青藏高原饲用燕麦研究与生产现状、存在问题与对策[J]. 草业科学,2004,21(11):17-21.
- [2] 陈恭,郭丽梅,任长忠,等. 行距及间作对箭筈豌豆与燕麦青干草产量和品质的影响[J]. 作物学报,2011,37(11):2066-2074.
- [3] 冯晓敏. 燕麦||大豆,燕麦||绿豆系统生理生态机制研究[D]. 北京:中国农业大学,2015.
- [4] Li L, Sun J H, Zhang F S, *et al.* Wheat/maize or wheat/soybean strip intercropping: I. Yield advantage and inter-specific interactions on nutrients [J]. Field Crops Res, 2001,71(2):123-137.
- [5] 李隆. 间套作强化农田生态系统服务功能的研究进展与应用展望[J]. 中国生态农业学报,2016,24(4):403-415.
- [6] 赵德强,李彤,侯玉婷. 玉米大豆间作模式下干物质积累和产量的边际效应及其系统效益[J]. 中国农业科学,2020,53(10):1971-1985.
- [7] 王雪蓉,张润芝,李淑敏,等. 不同供氮水平下玉米/大豆间作体系干物质积累和氮素吸收动态模拟[J]. 中国生态农业学报,2019,27(9):1354-1363.
- [8] 徐长帅,商伟,冯雪梅,等. 玉米大豆间作田间配置经济效益研究[J]. 种子科技,2015,33(11):44-46.
- [9] 杨学超,胡跃高,钱欣,等. 施氮量对绿豆||燕麦间作系统生产力及氮吸收累积的影响[J]. 中国农业大学学报,2012,17(4):46-52.
- [10] 王妍. 紫花苜蓿||燕麦间作效应及氮素吸收机理研究[D]. 长春:东北师范大学,2019.
- [11] 李合生. 现代植物生理学(第3版)[M]. 北京:高等教育出版社,2012.
- [12] 孟亚利,曹卫星,柳新伟,等. 水稻地上部干物质分配动态模拟的初步研究[J]. 作物学报,2004,30(4):376-381.
- [13] Weier K L, Doran J W, Power J F, *et al.* Denitrification and the di nitrogen/nitrous oxide ratio as affected by soil water, available carbon, and nitrate[J]. Soil Science Society of America Journal, 1993,57(1):66.
- [14] Togun A O, Akanbi W B, Dris R. Influence of compost and nitrogen fertilizer on growth, nutrient uptake and fruit yield of tomato (*Lycopersicon esculentum*) [J]. J Crop Res, 2003,98:40-56.
- [15] Akanbi W B, Togun O A, Olaniran J O, *et al.* Physico-chemical properties of eggplant (*Solanum melongena* L.) fruit in response to nitrogen fertilizer and fruit size [J]. Agr J, 2007,2(1):140-148.
- [16] Aminifard M H, Aroiee H, Fatemi H, *et al.* Performance of eggplant (*Solanum melongena* L.) and sweet pepper (*Capsicum annuum* L.) in intercropping system under different rates of nitrogen[J]. Horticulture Environment and Biotechnology, 2010,51(5):367-372.
- [17] Ahlawat A, Jain V, Nainawatee H S. Effect of low temperature and Rh izospheric application of naringenin on pea-rhizobium leguminosarum biovar viciae symbiosis [J]. Journal of Plant Biochemistry and Biotechnology, 1998,7(1):35-38.
- [18] 焦念元,宁堂原,赵春,等. 施氮量和玉米-花生间作模式对氮磷吸收与利用的影响[J]. 作物学报,2008,34(4):706-712
- [19] 肖靖秀,汤利,郑毅,等. 大麦/蚕豆间作条件下供氮水平对作物产量和大麦氮吸收累积的影响[J]. 麦类作物学报,2016,31(3):499-503.
- [20] 王旭,曾昭海,胡跃高,等. 豆科与禾本科牧草混播效应研究进展[J]. 中国草地学报,2007,29(4):92-98.
- [21] 熊淑萍,姬兴杰,李春明,等. 不同肥料处理对土壤铵态氮时空变化影响的研究[J]. 农业环境科学学报,2008,27(3):978-983.
- [22] 俞华林,张恩和,王琦,等. 灌溉和施氮对免耕留茬春小麦农田土壤有机碳、全氮和籽粒产量的影响[J]. 草业学报,2013,22(3):227-233.
- [23] 张慧霞,周怀平,杨振兴,等. 长期施肥对旱地土壤剖面硝态氮分布和累积的影响[J]. 山西农业科学,2014,42

- (5):465-469.
- [24] 张亦涛,任天志,刘宏斌,等. 玉米追氮对玉米//大豆间作体系产量和土壤硝态氮的影响及其后茬效应[J]. 植物营养与肥料学报,2016,22(1):104-110.
- [25] 李玉英,余常兵,孙建好,等. 蚕豆/玉米间作系统经济生态施氮量及对氮素环境承受力[J]. 农业工程学报,2008,24(3):223-227.
- [26] 鲍士旦. 土壤农化分析(第三版)[M]. 北京:中国农业出版社,2000.
- [27] 张水清,林杉,郭斗斗,等. 长期施肥下潮土全氮、碱解氮含量与氮素投入水平关系[J]. 中国土壤与肥料,2017,4(6):23-29.
- [28] 王乐,张玉霞,于华荣,等. 氮肥对沙地燕麦生长特性及产量的影响[J]. 草业科学,2017,34(7):1516-1521.
- [29] 马迎辉,王玲敏,黄玉芳,等. 氮肥运筹对冬小麦干物质累积、产量及氮素吸收利用的影响[J]. 华北农学报,2013,28(1):187-192.
- [30] 戴延波,孙传范,荆奇,等. 不同施氮水平和基追比对小麥籽粒品质形成的调控[J]. 作物学报,2005(2):248-253.
- [31] 胡群,夏敏,张洪程,等. 氮肥运筹对钵苗机插优质食味水稻产量及氮素吸收利用的影响[J]. 作物学报,2016,42(11):1666-1676.
- [32] 柯健,陈婷婷,徐浩聪,等. 控释氮肥运筹对钵苗摆栽粳粳杂交稻甬优1540产量及氮肥利用的影响[J]. 作物学报:2021,47(7):1-13.
- [33] Cong W F, Hoffland E, Li L, *et al.* Intercropping enhances soil carbon and nitrogen[J]. *Global Change Biology*,2015,21(4):1715-1726.
- [34] 石海,苗淑杰,柏会子. 大豆根系特征对氮阻遏的适应性调节[J]. 大豆科学,2013,32(4):501-505+511.
- [35] 张唯一,张志亮,郑彩霞,等. 玉米-大豆间作系统土壤水分分布特征研究进展[J]. 灌溉排水学报,2018,37(S2):131-133.
- [36] 柴强,胡发龙,陈桂平. 禾豆间作氮素高效利用机理及农艺调控途径研究进展[J]. 中国生态农业学报,2017,25(1):19-26.
- [37] 关正翔,娜尔克孜,朱亚琼,等. 不同混播方式下燕麦+箭筈豌豆混播草地的生产性能及土壤养分特征[J]. 草业科学,2019,36(3):772-784.
- [38] 刘好. 甘肃省土壤全氮含量空间分布及与土地利用的关系[D]. 兰州:甘肃农业大学,2010.
- [39] 王兴萌,陈志豪,李永春,等. 氮素形态及配比对毛竹和青冈实生苗生长特性的影响[J]. 生态学杂志,2019,38(9):2655-2661.
- [40] AGEHARA S, WARNCKE D D. Soil moisture and temperature effects on nitrogen release from organic nitrogen sources[J]. *Soil Science Society of America Journal*,2005,69(6):1844-1855.
- [41] 王晓巍. 混作对大豆、玉米生长发育及土壤无机氮的影响[D]. 哈尔滨:东北农业大学,2012.
- [42] 李俊杰,邹洪琴,许发辉,等. 土壤微生物量氮对小麦各生育期氮素形态的调控[J]. 植物营养与肥料学报,2021,27(8):1321-1329.
- [43] 蔡雨,刘晓侠,吴娜,等. 灌溉定额对春播裸燕麦土壤氮素的影响[J]. 江苏农业科学,2016,44(10):165-168.
- [44] 杨亚亚,吴娜,刘吉利,等. 马铃薯-燕麦间作对马铃薯氮含量和土壤氮素的影响[J]. 浙江农业学报,2019,31(12):1955-1962.
- [45] 李玉英,孙建好,余常兵,等. 施氮量和蚕豆/玉米间作对土壤无机氮时空分布的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2009,15(4):815-823.
- [46] 夏瑀. 大豆/玉米混作对土壤无机氮及作物产量影响的研究[D]. 哈尔滨:东北农业大学,2013.

## Effects of nitrogen application system and intercropping on oat nitrogen uptake and soil nitrogen

ZHANG Ning, ZHAO Gui-qin, ZHANG Li-rui, DU Wen-pan, CHAI Ji-kuan\*

(College of Pratacultural Science, Gansu Agricultural University, Key Laboratory of Grassland Ecosystem, Ministry of Education, Sino-U. S. Centers for Grazing Land Ecosystem Sustainability, Lanzhou 730070, China)

**Abstract:** [Objective] The objective was to study the impacts of different nitrogen application systems on oat ab-

sorption and soil nitrogen accumulation in an oat/pea intercropping system. **【Method】** A randomized block design was employed. Four nitrogen application systems were tested: N0 (no N), N1 (20% base fertilizer + 20% tillering stage + 60% topdressing stage), N2 (20% base fertilizer + 30% tillering stage + 50% topdressing stage), and N3 (20% base fertilizer + 40% tillering stage + 40% topdressing stage). Three cropping modes (oat/pea intercropping, oat monoculture and pea monoculture) were studied to assess the effects of nitrogen application regimes on oat nitrogen uptake and soil nitrogen. **【Result】** The study found that nitrogen application and intercropping significantly influenced oat grain yield, nitrogen uptake and soil nitrogen. Intercropped oat had the highest grain yield under the N2 treatment, which was 22.48% higher than that under N3. Oat nitrogen uptake intercropping under N2 treatment was the highest (71.2 kg/hm<sup>2</sup>), 49.9% higher than that of N0. During the growth stages, oat nitrogen uptake increased by 26.5%, 15.8%, 7.3% and 17.1% at jointing stage, heading stage, filling stage and maturity stage, respectively, compared with that of monoculture oat. Soil total nitrogen content in the 0~20 cm soil layer increased by 12.9%, 11.2%, 15.4% and 6.9% under N0, N1, N2 and N3 treatments, respectively, compared with monoculture. Intercropped oats exhibited higher soil nitrate nitrogen and ammonium nitrogen than monoculture oats during various growth stages. **【Conclusion】** In the 20~40 cm soil layer, intercropped oats showed higher total nitrogen and nitrate nitrogen content than monoculture oat. Ammonium nitrogen content decreased, although the difference not significant.

**Key words:** oat/pea intercropping; nitrogen absorption; soil nitrogen

(责任编辑 刘建荣)